

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Minyak merupakan salah satu bahan isolator, penggunaan minyak ini digunakan pada transformator sebagai pendingin pada transformator untuk menjaga transformator dari gangguan listrik dan lainnya. Minyak transformator ini tentunya harus memiliki perawatan agar penggunaannya sesuai. Minyak trafo ketika menjadi limbah ini sulit terurai maka dari itu minyak trafo bekas bisa digunakan kembali dengan cara melakukan *re-purifikasi*.

2.1.1 Minyak Transformator

Minyak transformator adalah zat isolasi khusus yang digunakan dalam transformator untuk isolasi listrik dan pendinginan. Ini menjaga transformator dari gangguan listrik, memberikan pendinginan, dan melindungi oksidasi serta korosi. Minyak transformator juga berperan dalam isolasi termal dan perlindungan terhadap lonjakan tegangan transien. Pemeliharaan rutin minyak transformator sangat penting untuk menjaga kualitas dan kinerja transformator.

Minyak isolator transformator dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yakni minyak mineral, minyak sintetik, dan minyak organik. Minyak mineral adalah hasil pengolahan minyak bumi, terbuat dari fraksi minyak diesel dan turbin, dengan struktur kimia yang kompleks. Pemilihan jenis minyak bergantung pada lingkungan penggunaan transformator. Sebagai contoh, askarel, jenis minyak sintetik, dipilih untuk lokasi dengan risiko kebakaran tinggi karena sifatnya yang sulit terbakar dan tidak mudah teroksidasi.

Minyak isolasi mineral diperoleh melalui destilasi minyak bumi, melalui beberapa tahap destilasi untuk mencapai tingkat tahanan yang tinggi dan stabilitas panas yang baik. Minyak isolasi sintetik dihasilkan melalui proses kimia untuk meningkatkan karakteristik isolasi dibandingkan dengan minyak mineral, namun memiliki kelemahan berupa dampak negatif terhadap lingkungan. Sementara itu, minyak isolasi organik diperoleh dari ekstraksi tumbuhan seperti jarak, kedelai, dan kelapa. (Husnayain, Latif and Garniwa, 2016).

Minyak transformator mempunyai unsur atau senyawa hidrokarbon yang terkandung dalam minyak transformator ini adalah :

- a. Senyawa hidrokarbon parafinik.
- b. Senyawa hidrokarbon naftenik.
- c. Senyawa hidrokarbon aromatik.

Selain tiga komponen tersebut, minyak transformator juga mengandung senyawa yang dikenal sebagai zat aditif, meskipun kandungannya sangat minimal. Peningkatan suhu pada transformator dapat mengakibatkan terjadinya proses hidrokarbon dalam minyak. Nilai tegangan tembus dan kerapatan arus konduksi adalah beberapa indikator atau variabel yang digunakan untuk menentukan apakah suatu minyak transformator memenuhi persyaratan ketahanan listrik yang berlaku. (Djufri, 2021).

Minyak mineral transformator mengandung beragam senyawa hidrokarbon seperti naftena, aromatik, dan parafin. Untuk meningkatkan kualitasnya, minyak ini biasanya diperkaya dengan bahan tambahan seperti penghambat api dan antioksidan. Selama proses pengoperasian trafo, beberapa logam berat dapat

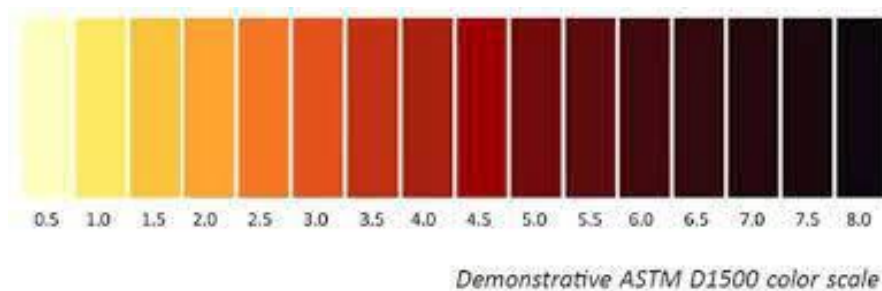
mencemari minyak, termasuk Fe, Al, Ag, Pb, Cu, Sn, dan Zn. Logam-logam ini berasal dari berbagai komponen trafo, seperti gulungan yang mengandung tembaga (Cu), tangki dan inti yang mengandung besi (Fe), serta komponen lainnya seperti solder yang mengandung timbal (Pb), isolator yang mengandung aluminium (Al), dan komponen periferan yang mengandung timah (Sn), seng (Zn), dan perak (Ag). Adanya interaksi antara minyak dan logam-logam ini dapat terjadi selama proses transportasi, pemasangan, serta selama operasi trafo. Hasil uji kuantitas logam dalam sampel minyak transformator menggunakan Spektrometri Emisi Optik-Plasma Berpasangan Induktif (ICP) menunjukkan adanya Fe, Al, Ag, Pb, Cu, Sn, dan Zn dalam minyak. Dari hasil analisis, disimpulkan bahwa kandungan tembaga dalam minyak transformator lebih tinggi daripada kandungan besi, menunjukkan adanya keberadaan logam dalam minyak tersebut, (Tiwari *et al.*, 2024).

Ketika minyak trafo mineral terkena panas, minyak tersebut akan terurai dan gas yang umumnya dihasilkan adalah etana, etilen, dan metana. Dengan demikian, terjadi penguraian hidrokarbon yang ada dalam minyak dan terurai menjadi hidrogen dan karbon dan gas-gas ini kemudian bereaksi satu sama lain dan membentuk gas lain seperti metana (CH₄), etana (C₂H₆), asetilena (C₂H₄), Hidrogen (H₂). Oleh karena itu kenaikan suhu menyebabkan terbentuknya gas-gas tersebut pada minyak isolasi. Selanjutnya penguraian selulosa dan kertas bahan isolasi disebabkan oleh rendahnya energi percikan, corona (*partial discharge*), dan panas berlebih pada insulasi pada transformator. Karbon dioksida CO₂ dan gas karbon monoksida CO terbentuk dari pemutusan rantai cincin glukosa akibat depolimerisasi dan larut dalam minyak dalam jumlah yang berbeda. Dalam selulosa

terdapat atom oksigen dan karenanya CO, CO₂ dan H₂O terbentuk, (Tiwari *et al.*, 2024)

Sesuai survei literatur, penelitian dalam beberapa tahun terakhir yang bisa dijadikan minyak isolasi alternatif adalah:

- a. Minyak kelapa murni bisa menjadi pilihan yang baik sebagai alternatif ke minyak mineral konvensional untuk transformator daya. Karena memiliki tegangan tembus tertinggi, viskositas terendah dan kadar air terendah dibandingkan dengan minyak sawit dan lainnya minyak isolasi terbaru, (Mahanta and Laskar, 2017).
- b. Minyak nabati yang bisa dijadikan salah satu alternatif untuk menggantikan minyak mineral pada trafo cocok untuk dilakukan digunakan dalam transformator tertutup, (Mahanta and Laskar, 2017).
- c. Laju produksi gas terlarut dalam ester selama gangguan termal dan listrik lebih sedikit dibandingkan dengan minyak mineral berbasis minyak bumi. Ester didominasi stabil pada rentang suhu tertentu gangguan termal, (Mahanta and Laskar, 2017).
- d. Besarnya pelepasan sebagian ester asam lemak sawit sedikit lebih, rendah dibandingkan yang berbasis minyak bumi minyak mineral selama bobot penuaan. Oleh karena itu, kelapa sawit berlemak ester asam mempunyai potensi yang baik untuk dimanfaatkan sebagai tenaga minyak trafo dalam aplikasi sistem tenaga listrik, (Mahanta and Laskar, 2017).



Gambar 2.1 Warna Minyak Transformator

Sumber : (Suherman and Akbar, 2020)

Tabel 2.1 Pengelompokan Berdasarkan Warna Minyak Trafo

Sumber: (Lutfiah, 2017)

Warna dan Kelompok	Angka asam	IFT (dyn/cm)	Diagnosa
Kuning pucat #0.5	0.03 0.1	45 30	Pendingin dan isolasi baik
Kuning Muda #1.0	0.05 0.1	27 29	Terjadi endapan yang membaur di minyak yang akan menyebabkan IFT menurun
Kuning terang #1.5-2.0	0.11 0.15	24 27	Terjadi endapan asam tipis pada lilitan yang akan menjadi penyebab gangguan
Kuning sawo #2.5	0.1 0.4	18 24	Hampir semua transformator pada keadaan ini terdapat endapan pada lilitan dan inti
Kuning sawo #3.0-5.0	0.41 0.55	14 18	Endapan akan beroksidasi dan kemudian mengeras serta terjadi juga diisolasi kertas
Coklat kehitaman #5.5-6.5	0.55 1.5	9 14	Terdapat sludge yang menyumbat sirip-sirip pendingin yang menyebabkan kenaikan temperatur sampai 20°C
Hitam #7.0-8.0	≥1 Dan lebih	6 9	Diperlukan suatu cara untuk menghilangkan sludge dan transformator harus dibongkar dan diperiksa, tidak hanya mengganti minyak.

Gambar 2.1 dan Tabel 2.1 menunjukkan dimana warna minyak transformator dapat menjadi indikator kualitas yang berguna untuk mengevaluasi kondisi dan performa transformator. Mulai dari warna kuning pucat hingga hitam, terdapat

perubahan dalam angka asam dan IFT yang menggambarkan tingkat endapan dan kontaminasi dalam minyak. Warna kuning muda hingga kuning sawo menandakan adanya endapan yang mungkin mempengaruhi lilitan transformator, sedangkan warna coklat kehitaman hingga hitam mengindikasikan tingkat kontaminasi yang tinggi yang dapat menyebabkan masalah seperti peningkatan temperatur dan penyumbatan pendingin. Dengan demikian, pemantauan warna minyak transformator dan parameter kualitasnya menjadi penting dalam menjaga kinerja dan umur pakai transformator tersebut.

Secara umum, dielektrik cair lebih banyak digunakan sebagai material isolasi dalam peralatan tegangan tinggi karena dielektrik cair mempunyai beberapa kelebihan yaitu (Tadjuddin, 1998) :

1. Dielektrik cair memiliki kerapatan yang 1000 kali lebih tinggi daripada dielektrik gas, sehingga memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi.
2. Dielektrik cair secara bersamaan akan mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi melalui proses konversi, dengan menghilangkan panas yang timbul akibat rugi energi.
3. Dielektrik cair memiliki kecenderungan untuk dapat memperbaiki diri sendiri (*self-healing*) dalam kasus pelepasan muatan (*discharge*).

Meskipun demikian, dielektrik cair juga memiliki kekurangan yaitu rentan terhadap kontaminasi. Keberadaan tegangan berlebih (*over voltage*) dan pemanasan termal (*thermal stress*) karena disipasi daya di dalam transformator dapat menyebabkan timbulnya kontaminan dalam bentuk partikel padat, cair, atau gas

pada bahan dielektrik cair. Kontaminan ini sangat merugikan karena dapat menurunkan kualitas dielektrik cair pada peralatan tegangan tinggi, terutama pada transformator. Bahkan, pada gas yang mudah terbakar, jika ada oksigen dan temperatur yang cukup tinggi, dapat menyebabkan kebakaran pada transformator.

2.1.2 Karakteristik Tempurung Kelapa

Buah kelapa terdiri dari sabut kelapa, tempurung kelapa, daging kelapa dan air kelapa. Sabut kelapa merupakan bahan berserat dengan ketebalan sekitar 5 cm, dan merupakan bagian terluar dari buah kelapa. Tempurung kelapa terletak di sebelah dalam sabut, ketebalannya berkisar 3,5 mm. Ukuran buah kelapa dipengaruhi oleh ukuran tempurung kelapa yang sangat dipengaruhi oleh usia dan perkembangan tumbuhan kelapa. Tempurung kelapa beratnya antara 15 – 19 % berat kelapa, (Suhartana, 2007).

Karakteristik khas dari tempurung kelapa muda dapat diuraikan sebagai berikut:

a. Kekerasan dan Ketidakfleksibelan

Tempurung kelapa memiliki sifat dasar yang keras karena tidak memiliki serat pada strukturnya. Kekerasan ini membuatnya sulit dipotong secara manual tanpa menggunakan bantuan alat mesin. Perendaman dalam larutan NaOH dan perebusan dapat melunakkan kulit tempurung kelapa muda, namun setelah kering, tempurung tersebut kembali mengeras. Pembentukan tempurung kelapa muda yang telah dilunakkan tetap terbatas dalam mencapai bentuk yang signifikan, seiring dengan bentuk bulat asli buah kelapa yang mempengaruhi sifat lengkungnya.

b. Ketebalan Permukaan yang Tidak Merata

Tempurung kelapa memiliki ketebalan permukaan yang tidak merata, yang secara signifikan memengaruhi proses pembentukan dan hasil bentuk produk.

c. Motif Permukaan yang Khas

Permukaan tempurung kelapa memiliki motif yang terbentuk dari garis urat serabut, memberikan nilai estetika yang unik pada produk yang terbuat dari tempurung kelapa.

d. Kekuatan Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa memiliki kekuatan yang sangat baik, membuatnya tahan terhadap pecahan ketika terjatuh.

e. Daya Tahan Air

Pori-pori tempurung kelapa dengan tingkat kerapatan yang tinggi membuatnya mampu menahan dan menyerap air, menunjukkan sifat tahan air yang baik.(Arfadiani, 2015).

Arang merupakan suatu padatan berpori yang mengandung 85-95% karbon, dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon dengan pemanasan pada suhu tinggi, (Jamilatun, Isparulita and Putri, 2014).

Struktur arang/karbon aktif menyerupai struktur grafit. Grafit mempunyai susunan seperti pelat-pelat yang sebagian besar terbentuk dari atom karbon yang berbentuk heksagonal. Pada grafit, jarak antara pelat-pelat lebih dekat dan terikat lebih teratur dari pada struktur karbon aktif, (Suhartana, 2007).

2.1.3 Karakteristik Fisik Isolasi Minyak

Isolasi minyak transformator yang baik mempunyai karakteristik fisik diantaranya, yaitu :

a. Kejernihan

Kejernihan penampilan dilihat dari warna minyak, warna minyak yang baik memiliki warna yang jernih, bersih, dan bebas endapan. Selama transformator dioperasikan, isolasi minyak akan melarutkan suspensi atau endapan. Semakin banyak isolasi minyak mengalami endapan yang terlarut, maka warna minyak akan semakin gelap, (Akbar, 2018).

b. Viskositas

Viskositas minyak adalah suatu hal yang sangat penting karena minyak transformator yang baik akan memiliki viskositas yang rendah, sehingga dapat bersirkulasi dengan baik dan akhirnya pendinginan inti dan belitan transformator dapat berlangsung dengan baik pula. Nilai viskositas untuk minyak baru harus $\leq 18 \text{ cSt}$. Uji viskositas hanya dilakukan untuk minyak isolasi baru, (Akbar, 2018).

Standar nilai viskositas untuk minyak trafo berdasarkan IEC 60296-2003 adalah 12 cSt. Alat yang di gunakan pada pengujian viskositas adalah alat viskositas dinamis. Sedangkan yang nilai yang dibutuhkan adalah nilai viskositas kinematik. Oleh karena itu nilai viskositas dinamis yang diperoleh dari hasil pengujian menggunakan viskometer di konversi menjadi nilai viskositas kinematik yaitu dengan menggunakan persamaan dibawah ini, (Jumardin, Ilham and Salim, 2019).

$$V = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.1)$$

V= Viskositas Kinematik (cSt)

μ = Viskositas Dinamis (cP)

ρ = Massa jenis minyak (g/cm^3)

c. Massa Jenis

Minyak transformator harus mempunyai massa jenis yang kecil, agar partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat. Massa jenis merupakan perbandingan massa suatu volume cairan pada suhu $15,560^\circ\text{C}$ dengan massa volume air. Massa jenis isolasi minyak transformator harus lebih ringan dari pada massa jenis air, (Akbar, 2018).

Standar nilai viskositas untuk minyak trafo berdasarkan IEC 60296-2003 adalah 12 cSt. Untuk mengukur massa jenis ini dimulai dengan mengukur gelas ukur kosong tanpa minyak ditimbang bobotnya. Selanjutnya minyak dimasukkan ke dalam gelas ukur sampai tidak adanya gelembung, minyak yang sudah di dalam gelas ukur ditimbang bobotnya. Massa jenis dihitung dengan persamaan:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{v} \quad (2.2)$$

Keterangan:

ρ = Massa jenis minyak transformator (g/cm^3)

m_1 = Massa gelas ukur kosong (g)

m_2 = Massa gelas ukur yang diisi dengan minyak (g)

v = Volume minyak (cm^3)

d. Titik Nyala

Titik nyala pada minyak transformator yang baru seharusnya tidak kurang dari 135°C , sementara suhu titik nyala pada minyak bekas tidak boleh kurang dari 130°C . Pengetahuan tentang titik nyala minyak transformator penting untuk pertimbangan keamanan. IEC telah menetapkan metode pengujian titik nyala

minyak transformator menggunakan metode pensky martin yang tertutup. Sifat-sifat titik nyala minyak tersebut memainkan peran penting dalam menentukan kemungkinan terjadinya penguapan dalam minyak. Apabila titik nyala minyak rendah, hal ini mengindikasikan adanya kandungan yang bersifat volatile combusite, sehingga minyak dapat dengan mudah menguap dan mengakibatkan penurunan volume minyak, yang pada gilirannya membuat minyak menjadi lebih kental (viskositasnya semakin tinggi), (Akbar, 2018).

e. Titik Tuang

Titik tuang digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan jenis peralatan yang cocok untuk menggunakan minyak isolasi. Titik tuang mencerminkan batas temperatur di bawah normal di mana minyak isolasi akan tetap mengalir saat didinginkan. Semakin rendah nilai titik tuang, semakin baik kualitas isolasi minyak transformator., (Akbar, 2018).

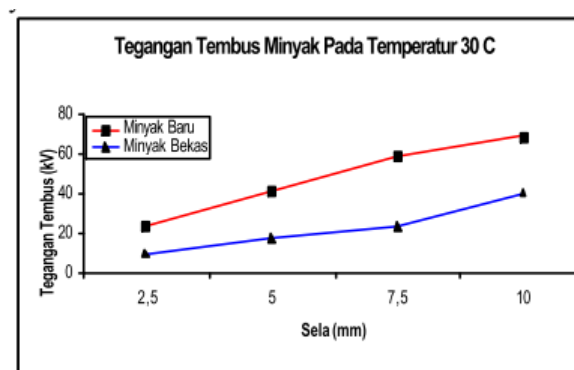
2.1.4 Karakteristik Elektrik Isolasi Minyak

Isolasi minyak transformator yang baik mempunyai karakteristik fisik diantaranya, yaitu :

a. Tegangan Tembus

Uji tegangan tembus (*Breakdown Voltage Test*) merupakan salah satu metode *predictive maintenance* yang diterapkan pada minyak isolasi. Tujuan dari uji ini adalah untuk mengevaluasi kemampuan isolasi minyak dalam menghadapi tegangan yang diberikan. Jika nilai tegangan tembus tinggi terdeteksi, dapat disimpulkan bahwa kondisi minyak masih baik, dan sebaliknya, (Widyastuti and Wisnuaji, 2019).

Tegangan tembus yang terlalu rendah menunjukkan adanya kontaminasi seperti air, kotoran atau partikel konduktif dalam minyak. Tegangan tembus disini merupakan nilai batas kemampuan untuk menahan tekanan elektrik. Kandungan air dan partikel-partikel pada isolasi minyak dapat menurunkan nilai batas tegangan tembus. Sehingga isolasi minyak yang baik memiliki batas tegangan tembus yang tinggi, (Akbar, 2018).



Gambar 2.2 Grafik Tegangan Tembus Temperature 30 °C
Sumber: (Syakur and Facta, 2005)

Berdasarkan ilustrasi di atas, dapat dilihat bahwa tegangan tembus pada isolasi minyak baru lebih tinggi daripada isolasi minyak bekas. Perbedaan ini disebabkan oleh adanya partikel dan uap air pada minyak bekas, yang menyebabkan ketidakmurnian dalam minyak. Jika terdapat banyak partikel melayang dalam minyak, partikel tersebut dapat membentuk jembatan antara elektroda, mengakibatkan kegagalan isolasi. Namun, jika hanya ada satu partikel, partikel tersebut akan memperluas area medan lokal, yang ditentukan oleh bentuk partikel itu sendiri. Jika perluasan area medan melebihi ketahanan minyak cair, maka kegagalan lokal, yaitu kegagalan dekat partikel asing, akan terjadi. Ini dapat menyebabkan pembentukan gelembung gas, akhirnya menyebabkan kegagalan pada minyak.

Minyak bekas umumnya memiliki kadar uap air yang lebih tinggi daripada minyak baru. Pada medan listrik tinggi, molekul uap air terlarut dapat terpisah dari minyak dan terpolarisasi menjadi suatu dipol. Jika jumlah molekul uap air cukup banyak, dapat terbentuk kanal peluahan yang akan merambat dan memanjang, menyebabkan tembus listrik. Ketidakmurnian ini sangat berpengaruh pada kegagalan isolasi, sehingga minyak bekas cenderung lebih rentan terhadap *discharge* dibandingkan dengan minyak baru karena kekuatan isolasinya yang tidak sebaik minyak baru, (Syakur and Facta, 2005).

Pemurnian menggunakan arang aktif dari tongkol jagung pada minyak trafo bekas akan meningkatkan tegangan tembus isolasi minyak trafo. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, sifat arang aktif memungkinkan penyerapan partikel-partikel lain yang ada dalam minyak trafo, yang pada gilirannya meningkatkan kualitas minyak trafo bekas. Hasil dari lima pengujian menunjukkan nilai rata-rata sebesar 27,5 kV. Percobaan kedua mencapai nilai tertinggi, yaitu 27,98 kV. Meskipun tegangan tembus ini masih sedikit di bawah standar PLN 49-1 yang membutuhkan nilai ≥ 30 kV/2,5 mm, namun penambahan arang aktif dari tongkol jagung telah meningkatkan tegangan tembus minyak trafo dibandingkan dengan minyak trafo bekas yang belum mengalami penambahan arang aktif dari tongkol jagung. (Jahidi, Pratiwi and S, 2020).

b. Tahanan jenis

Tahanan jenis yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi yang bersifat konduktif (*conductive contaminants*). Nilai tahanan jenis sangat berpengaruh

pada kontaminan yang bersifat konduktif, semakin banyak kontaminan konduktif maka semakin rendah tahanan jenis isolasi minyak, (Akbar, 2018).

c. Faktor disipasi dielektrik

Harga yang tinggi dari faktor ini mengindikasikan keberadaan kontaminasi atau produk kerusakan (*deterioration product*), seperti air, hasil oksidasi, koloid bermuatan, logam alkali, dan sebagainya. Faktor disipasi listrik merupakan indikator dari rugi dielektrik pada minyak. Jika nilai faktor disipasi dielektrik tinggi, hal tersebut menunjukkan adanya kontaminasi atau kerusakan akibat air, hasil oksidasi, koloid bermuatan, logam alkali, dan lain-lain. Faktor disipasi dielektrik berkaitan dengan tahanan jenis, sehingga nilai faktor disipasi dielektrik yang tinggi akan menunjukkan rendahnya tahanan jenis minyak, (Akbar, 2018).

2.1.5 Karakteristik Kimia Isolasi Minyak

Isolasi minyak transformator yang baik mempunyai karakteristik kimia diantaranya, yaitu :

a. Kadar Asam

Standar nilai kandungan asam menurut ASTM D 3487 disyaratkan kurang dari 0,03 mg KOH/gr. Kandungan asam memiliki kecenderungan untuk meningkat seiring berjalannya waktu atau umur minyak. Perbedaan dalam pengaruh lingkungan dan usia operasional minyak dapat menyebabkan variasi dalam kandungan asamnya. Asam dapat muncul akibat pemanasan berlebih (*thermal stress*) pada minyak, dan proses ini akan terus berlanjut sejalan dengan usia operasional minyak transformator, (Akbar, 2018).

b. Stabilitas Oksidasi

Stabilitas oksidasi merujuk pada kemampuan isolasi minyak untuk mengatasi proses oksidasi yang terjadi. Proses oksidasi dapat mengakibatkan isolasi minyak memiliki kecenderungan untuk menghasilkan zat asam dan partikel padat (kontaminan) yang membentuk endapan. Zat asam yang terbentuk dapat menyebabkan korosi pada logam di dalam peralatan transformator, sementara partikel padat dapat meningkatkan viskositas kinematik dan mengganggu konduktivitas termal. Oleh karena itu, keberadaan stabilitas oksidasi yang tinggi dan kemampuan pelarutan yang rendah pada isolasi minyak diharapkan dapat mengurangi persentase terjadinya proses oksidasi, (Akbar, 2018).

c. Kadar Air

Hal yang sangat berpengaruh pada kekuatan isolasi cair adalah terdapatnya air dalam bentuk titik-titik air yang masuk kedalam cairan isolasi. Kekuatan isolasi ini akan turun dengan tajam jika didalam air tersebut terdapat kotoran kotoran atau serat-serat. Nilai kandungan air berpengaruh terhadap tegangan tembus dan tahanan jenis isolasi minyak. Naiknya temperatur akan menyebabkan air mengalir dari isolasi kertas menuju isolasi minyak dan menurunkan tegangan tembus. Isolasi minyak yang baik mempunyai nilai kandungan air serendah mungkin, (Akbar, 2018).

Standar kadar air untuk minyak trafo berdasarkan IEC 60296-2003 adalah 30 mg/Kg. Pengukuran kadar air bisa dilakukan dengan cara memanaskan

minyak dalam oven pada suhu 130 °C selama 30 menit kemudian didinginkan lalu ditimbang, nilai kadar air bisa di ketahui dengan rumus:

$$\text{Kadar air(\%)} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\% \quad (2.3)$$

Keterangan:

W1 = Berat sampel awal sebelum pemanasan (gr)

W2 = Berat sampel setelah pemanasan (gr)

Untuk mendapatkan nilai mg/L maka nilai persen kadar air dikonversikan ke konsentrasi persen %W/V, (Rahmayani and Press, 2018)

$$\text{Kadar air\%} = \frac{X \text{ Mg}}{L} \times 100\% \quad (2.4)$$

2.1.6 *Re-Purifikasi Minyak Transformator*

Re-purifikasi merupakan proses pemurnian kembali minyak transformator untuk menghilangkan kontaminasi berupa pengotor debu, air dan gas. Purifikasi minyak transformator ini harus dilakukan karena untuk meningkatkan kinerja trafo dan memperpanjang masa pakai transformator, selain itu mengurangi anggaran pembelanjaan.

Purifikasi minyak transformator ini bisa dilakukan dengan menggunakan karbon yang diaktifkan seperti pada penelitian yang dilakukan penulis dengan menggunakan ATK yang diaktifkan, karena jika karbon diaktifkan akan membuat pori-pori membesar sehingga itu bisa menyerap partikel-partikel pengotor dengan proses adsorpsi. Selain menggunakan karbon yang diaktifkan bisa juga menggunakan bentonite, dan kaolin.

Adsorpsi merupakan peristiwa penyerapan suatu substansi yang berlangsung pada permukaan zat padat. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi proses adsorpsi yaitu:

a. Luas permukaan adsorben

Semakin banyak adsorbat yang dapat diserap maka semakin luas permukaan adsorben yang dibutuhkan, sehingga proses adsorpsi semakin efektif, (Sembiring and Sinaga, 2003).

b. Ukuran partikel

Kecepatan adsorpsi yang semakin besar disebabkan oleh penggunaan ukuran partikel yang semakin kecil. Contohnya ukuran partikel yang digunakan yaitu 20-50 mesh sehingga pada ukuran 50 mesh kecepatan adsorpsinya lebih besar daripada 20 mesh. Semakin banyak massa adsorben maka proses pengadsorpsian akan semakin lama, sehingga pada proses purifikasi akan semakin lama, (Sembiring and Sinaga, 2003).

Adsorpsi merupakan peristiwa menempelnya atom atau molekul suatu zat pada permukaan zat lain karena ketidakseimbangan gaya pada permukaan. Zat yang teradsorpsi disebut adsorbat dan zat pengadsorpsi disebut adsorben. Ada dua metode adsorpsi yaitu adsorpsi secara fisika (*physiosorption*) dan adsorpsi secara kimia (*chemisorption*). Pada proses adsorpsi secara fisika gaya yang mengikat adsorbat oleh adsorben adalah gaya-gaya van der Waals, (Meila Anggriani et al., 2021 dalam Ramdani, 2020).

2.1.7 Karbon Aktif

Tempurung kelapa sering diabaikan sebagai hasil samping dari industri pengolahan kelapa, meskipun ketersediaannya melimpah. Menariknya, arang dari tempurung kelapa ini masih dapat dimanfaatkan untuk membuat produk bernilai tinggi, seperti karbon aktif atau arang aktif.

Arang aktif ini bahan baku yang berasal dari hewan, tumbuh-tumbuhan, limbah ataupun mineral yang mengandung karbon dapat dibuat menjadi arang aktif, antara lain: tulang, kayu lunak, sekam, tongkol jagung, tempurung kelapa, sabut kelapa, ampas penggilingan tebu, ampas pembuatan kertas, serbuk gergaji, kayu keras dan batubara, (Sembiring and Sinaga, 2003).

Proses pengaktifan ATK ini terdapat 2 macam yaitu secara fisika dan kimia. Aktivasi fisika merupakan proses aktivasi dengan cara memutuskan ikatan karbon dari senyawa organik pada suhu tinggi dan bantuan CO₂ dan uap. Gas-gas tersebut berfungsi untuk memperluas struktur pori-pori arang sehingga meningkatkan luas permukaannya, menghilangkan substansi yang mudah menguap, serta menghilangkan hidrokarbon pengotor pada arang. Aktivasi fisika juga memiliki beberapa kekurangan seperti struktur pori arang yang dihasilkan kurang baik dan dalam prosesnya memerlukan suhu tinggi. kadar air semakin menurun dengan suhu yang semakin tinggi karena semakin tinggi suhu jumlah air yang menguap juga semakin besar. Semakin lama proses karbonisasi mestinya semakin kecil kadar airnya, namun yang terjadi sebaliknya, ini disebabkan karena pada proses karbonisasi yang semakin lama maka pori-pori dari arang akan makin terbuka, sehingga pada saat pemindahan arang dari *furnace* ke alat penimbangan untuk

menentukan kadar air, terjadi kontak langsung antara arang yang bersifat higroskopis dengan udara sehingga arang banyak menyerap uap air. Kadar karbon terikat dipengaruhi oleh kadar air, rendemen dan zat yang mudah menguap. Semakin kecil kadar air maka karbon terikat semakin banyak. Kadar karbon terikat merupakan jumlah karbon murni yang terkandung di dalam arang. Suhu yang semakin tinggi pada proses karbonisasi sangat berpengaruh pada kualitas dari arang, termasuk karbon terikat, (Hartanto and Ratnawati, 2010).



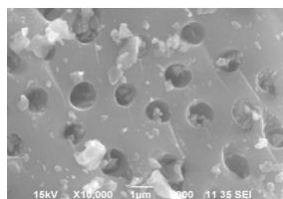
Gambar 2.3 Karbon Aktif Arang Tempurung Kelapa
Sumber : (Sembiring and Sinaga, 2003)

Langkah aktivasi secara kimia melibatkan penggilingan arang hingga mencapai ukuran antara 355 μm dan 710 μm . Arang kemudian direndam dalam larutan aktivator kimia (NaCl, NaOH, dan HCl) dengan konsentrasi 2% selama variasi waktu 1 jam, 2 jam, dan 4 jam. Setelah itu, arang dipisahkan dari larutan aktivator melalui proses penyaringan dan dikeringkan dengan dipanaskan pada suhu 350°C selama satu jam. Karbon aktif yang dihasilkan kemudian diuji untuk kadar air dan daya serapnya. Untuk mengidentifikasi pori yang terbentuk, permukaan karbon diamati menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

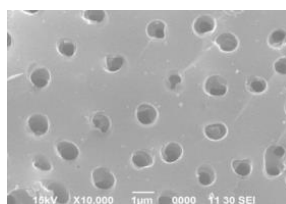
Proses karbonisasi menunjukkan hasil optimal pada suhu 500°C dan waktu 3 jam, dengan kadar air sebesar 18%, rendemen 23%, zat yang mudah menguap

sekitar 3%, dan kadar karbon terikat mencapai 61%. Aktivasi menggunakan NaOH selama 4 jam menghasilkan hasil terbaik dengan kadar air arang aktif sekitar 3,6% dan daya serap sekitar 12851,8797 mg/g. Hasil dari pengamatan *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan bahwa sebelum aktivasi, pori-pori yang terbentuk masih tertutup oleh kontaminan, sedangkan setelah aktivasi, pori-pori tersebut lebih terbuka, meningkatkan luas permukaan adsorpsi secara signifikan. (Hartanto and Ratnawati, 2010).

Satu atom C pada setiap sudutnya yang memiliki luas permukaan berkisar antara 300 m²/g hingga 3500 m²/g dan ini berhubungan dengan struktur pori internal sehingga mempunyai sifat sebagai adsorben, (Hartanto and Ratnawati, 2010).



Gambar 2.4 SEM Karbon dengan Suhu Karbonisasi 500 °C 3 Jam.
Sumber: (Hartanto and Ratnawati, 2010).



Gambar 2.5 SEM Karbon Aktif dengan Aktivator NaOH 4 jam
Sumber: (Hartanto and Ratnawati, 2010)

Pada suhu karbonisasi 500 °C kemampuan daya serap terhadap larutan I₂ terbaik pada waktu aktivasi 4 jam. Hal ini disebabkan karena pada kondisi tersebut daya serapnya paling tinggi. Pada keadaan karbonisasi 3 jam dan aktivator NaOH serta NaCl juga diperoleh daya serap terhadap iodine yang telah memenuhi standar dari

arang aktif yaitu lebih besar 750mg/g. Setiap aktivator mempunyai kemampuan yang berbeda-beda dalam mengaktivasi arang, (Hartanto & Ratnawati, 2010).

Pada Gambar 2.5 terlihat bahwa pada suhu karbonisasi 500 °C, arang aktif yang memiliki luas permukaan yang paling besar adalah pada waktu aktivasi 4 jam. Semakin lama waktu aktivasi, seharusnya semakin banyak pori yang terbentuk sehingga daya serap I₂ semakin besar pula. Akan tetapi daya serap tersebut akan mencapai maksimal dan harganya akan relatif konstan dengan bertambahnya waktu aktivasi karena pembentukan pori sudah maksimal. Dari hasil-hasil yang didapatkan, jenis aktivator dan lama aktivasi mempengaruhi mutu arang aktif yang dihasilkan. Pada percobaan ini, karakteristik arang aktif yang terbaik adalah dengan aktivator NaOH dengan waktu aktivasi 4 jam, dengan hasil kadar air arang aktif 3,6% dan daya serap I₂ 851,8797 mg/g, (Hartanto and Ratnawati, 2010).

Tahapan pembuatan karbon aktif dibagi menjadi 3, yaitu proses dehidrasi, karbonisasi, dan aktivasi.

a. Dehidrasi (*Dehydration*)

Dehidrasi adalah proses pemanasan pada temperatur 110 °C atau di bawah sinar matahari untuk menghilangkan air yang terdapat di dalam bahan baku, (Siti Miskah *et al.*, 2018).

b. Karbonisasi (*Carbonisation*)

Karbonisasi adalah proses penghilangan kandungan oksigen dan hidrogen pada bahan baku dengan menggunakan temperatur lebih dari 400 °C. Proses karbonisasi menghasilkan produk yang memiliki daya adsorpsi

rendah. Untuk itu, produk hasil karbonisasi perlu diaktivasi untuk menghasilkan karbon aktif dengan daya adsorpsi yang tinggi, (Siti Miskah *et al.*, 2018).

c. Aktivasi (*Activation*)

Aktivasi adalah proses memperbesar diameter dan volume pori karbon yang dihasilkan dari proses karbonisasi. Ikatan hidrokarbon dipecah sehingga karbon mengalami perubahan sifat, seperti luas permukaannya bertambah besar yang berpengaruh terhadap daya adsorpsi, (Sembiring and Sinaga, 2003).

Proses aktivasi karbon pada minyak trafo bertujuan untuk meningkatkan kemampuan karbon aktif untuk menyerap dengan membuat pori-pori dari karbon ini menjadi lebih besar sehingga dapat menyerap lebih baik partikel-partikel pengotor dan menghilangkan berbagai jenis kontaminan dan zat yang membuat merusak minyak isolasi dalam transformator.

Luas permukaan merupakan suatu parameter yang sangat penting dalam menentukan kualitas dari suatu karbon aktif sebagai adsorben. Hal ini disebabkan karena luas permukaan merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi daya adsorpsi dari suatu adsorben. Bilangan iod merupakan parameter paling penting digunakan untuk karakterisasi karbon aktif. Semakin besar angka iod maka semakin besar kemampuannya dalam mengadsorpsi adsorbat atau zat terlarut. Iod merupakan ukuran pada tingkat keaktifannya, (Rahmadani and Kurniawati, 2017).

Adapun standar karbon aktif menurut SNI dapat dilihat pada tabel:

Tabel 2.2 Standar Karbon Aktif (SNI) 06–3730-1995

Jenis persyaratan parameter	Parameter
Kadar Air	Mak 15%
Kadar Abu	Mak 10%
Kadar Zat Menguap	Mak 25%
Kadar Karbon Terikat	Min 65%

Jenis persyaratan parameter	Parameter
Daya Serap Terhadap Yodium	Min 750 mg/g
Daya Serap Terhadap Benzena	Min 25%

Kemampuan adsorpsi karbon aktif inti sawit dan tempurung kelapa dalam menghilangkan kontaminasi logam berat pada minyak pelumas bekas. Hasil percobaan menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan dari tempurung kelapa sawit dan kelapa mempunyai kapasitas adsorpsi yang signifikan terhadap logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg) yang digunakan pelumas. Analisis menunjukkan bahwa karbon aktif ini mampu mengikat ion logam berat pada permukaannya sehingga mengurangi konsentrasi logam berat pada minyak pelumas bekas. Penelitian ini menggunakan adsorben arang aktif yang diaktivasi menggunakan K_2CO_3 dan $NaHCO_3$ 1 M. Efektivitas mekanisme adsorpsi menggunakan karbon aktif dari inti sawit dan tempurung kelapa dalam menghilangkan logam berat tertentu, termasuk seng, kadmium, dan magnesium dari minyak pelumas bekas. Misalnya, Sampel yang digunakan pada percobaan ini adalah minyak pelumas bekas (A) berumur 3 bulan, minyak pelumas bekas (B) berumur 6 bulan, dan minyak pelumas murni (C) sebagai kontrol, setelah proses filtrasi, konsentrasi seng menurun dari $16,475 \pm 0,950$ ppm menjadi $10,375 \pm 0,171$ ppm pada sampel A bila diolah dengan adsorben karbon aktif dari cangkang inti sawit. Demikian pula konsentrasi seng pada sampel B bila diberi perlakuan dengan adsorben karbon aktif dari cangkang sawit juga mengalami penurunan dari $14,575 \pm 0,272$ ppm menjadi $5,450 \pm 0,3000$ ppm. Data kesetimbangan adsorpsi yang diperoleh dari percobaan dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan diperoleh nilai koefisien korelasi (R^2) yang tinggi untuk berbagai logam berat,

antara lain tembaga, kadmium, timbal, kromium, besi, seng, dan magnesium, karbon aktif tempurung kelapa efektif menghilangkan logam timbal, karbon aktif inti sawit tidak efektif. Konsentrasi kromium dapat dikurangi sedikit dengan menggunakan cangkang kelapa sawit namun sebenarnya ditingkatkan pada sampel B dengan menggunakan adsorben tempurung kelapa. Namun, baik karbon aktif inti sawit maupun tempurung kelapa tidak cocok untuk menghilangkan logam tembaga dan besi, seperti yang ditunjukkan oleh peningkatan konsentrasinya setelah proses filtrasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 dan 2.7, (Wathi *et al.*, 2023).

Samples	Control (C)		Sample A		Sample B	
	Before	After	Before	After	Before	After
Cu (ppm)	0.001±0.000	0.075±0.013	0.150±0.008	0.400±0.018	0.220±0.096	0.230±0.008
Fe (ppm)	1.502±0.092	1.150±0.129	4.650±0.159	8.500±0.258	3.350±0.289	3.400±0.183
Zn (ppm)	2.833±0.034	8.325±0.275	16.475±0.950	10.375±0.171	14.575±0.272	5.450±0.300
Cd (ppm)	0.020±0.008	0.000±0.000	0.020±0.008	0.018±0.009	0.030±0.008	0.000±0.000
Pb (ppm)	1.000±0.093	1.650±0.039	1.045±0.478	1.648±0.097	1.525±0.222	2.388±0.070
Cr (ppm)	0.410±0.051	0.065±0.013	0.400±0.065	0.210±0.026	0.445±0.039	0.135±0.013
Mg (ppm)	41.900±0.258	0.350±0.026	5.450±0.265	0.900±0.025	21.475±0.650	0.505±0.013

Gambar 2.6 Sampel minyak pelumas murni dan bekas sebelum dan sesudah penyaringan dengan cangkang sawit

Sumber: (Wathi *et al.*, 2023)

Samples	Control (C)		Sample A		Sample B	
	Before	After	Before	After	Before	After
Cu (ppm)	0.001±0.000	0.001±0.000	0.150±0.008	0.780±0.014	0.220±0.096	0.790±0.026
Fe (ppm)	1.502±0.092	3.650±0.625	4.650±0.159	13.500±0.942	3.350±0.289	14.125±0.618
Zn (ppm)	2.833±0.034	0.6700±0.071	16.475±0.950	5.838±0.344	14.575±0.272	5.400±0.280
Cd (ppm)	0.020±0.008	0.001±0.000	0.020±0.008	0.001±0.000	0.030±0.008	0.001±0.000
Pb (ppm)	1.000±0.093	0.563±0.172	1.045±0.478	0.410±0.037	1.525±0.222	0.438±0.222
Cr (ppm)	0.410±0.051	0.348±0.049	0.400±0.065	0.388±0.046	0.445±0.039	0.528±0.055
Mg (ppm)	41.900±0.258	1.475±0.171	5.450±0.265	3.625±0.222	21.475±0.650	0.645±0.037

Gambar 2.7 Sampel minyak pelumas murni dan bekas sebelum dan sesudah penyaringan dengan tempurung kelapa

Sumber: (Wathi *et al.*, 2023)

Pada pengukuran gas, karbon aktif cangkang sawit aktivasi kimia memiliki daya serap CO₂ sebesar 6,1% dan kadar CH₄ yang terukur sebesar 65,5% sedangkan pada karbon aktif komersial daya serap CO₂ sebesar 12,97% dan kadar CH₄ yang terukur sebesar 70,5%. Perbedaan pengukuran gas CH₄ dengan menggunakan adsorben karbon aktif komersial dan karbon aktif cangkang sawit

tidak terlalu jauh berbeda. Berdasarkan hasil analisis dengan GSA dan pengukuran gas, maka dapat disimpulkan karbon aktif yang berasal dari cangkang sawit memiliki potensi sebagai adsorben gas dilihat dari meningkatnya kadar CH₄ sebelum menggunakan adsorben dan setelah menggunakan adsorben, (Widyastuti, Sitorus and Jayuska, 2013).

2.1.8 Porositas

Porositas adalah perbandingan antara volume ruang pori (ruang kosong) dengan total volume dalam suatu material. Dengan kata lain, porositas mengukur seberapa banyak ruang kosong yang dapat diisi oleh air dan udara dalam volume tanah tersebut. Semakin tinggi porositas, semakin banyak ruang pori yang tersedia untuk menampung air dan udara. Porositas merupakan salah satu karakteristik fisis yang diperlukan terutama untuk mengkarakterisasi bahan padatan hasil proses maupun yang akan diproses kembali. Sifat porositas bahan saling mempengaruhi dan dipengaruhi oleh besaran fisis yang lain maupun sifat termalnya, misalnya bahan yang porous akan mempunyai nilai kerapatan yang rendah, luas permukaan yang lebih besar. Pori terbuka adalah pori yang berhubungan dengan cairan disekitarnya atau pori yang saling berhubungan termasuk didalamnya ada kapiler, retakan-retakan halus serta ketidakrataan. (Schon,J.H, 1996 dalam Pertiwi et al., 2015).

Untuk mencari nilai porositas dapat menggunakan rumus dibawah ini:

$$P = \frac{W_i - W_o}{W_o} \times 100 \quad (2.5)$$

Keterangan:

P= Porositas (%)

W_i = Berat arang dan air yang sudah disaring (gr)

W_o = Berat arang awal (gr)

2.1.9 Ketahanan Isolasi Terhadap Tegangan Tembus

Ketahanan isolasi terhadap tegangan tembus mengacu pada standar IEC 60422 tentang *dielectric strength*. Penerapan isolasi minyak pada peralatan listrik dibagi menjadi beberapa kategori berdasarkan penilaian tegangan kerja dari sebuah peralatan listrik.

Tabel 2.3 Kategori Peralatan Berdasarkan Tegangan Operasinya

Kategori	Tipe Peralatan
O	Transformator daya/reaktor dengan sistem tegangan nominal sama dengan dan diatas 400 kV
A	Transformator daya/reaktor dengan sistem tegangan nominal diatas 170 kV dan dibawah 400 kV. Juga untuk transformator yang dinilai untuk melayani beban penting.
B	Transformator daya/reaktor dengan sistem tegangan nominal diatas 72.5 kV dan dibawah 170 kV
C	Transformator daya/reaktor untuk aplikasi MV/LV misalnya sistem tegangan dengan nominal sampai dengan 72.5 kV Isolasi minyak pada circuit breaker dengan sistem tengan diatas 72.5 kV Isolasi minyak pada switch, seperti metal-enclosed <i>switchgear</i> dan perlengkapan kendali dengan sistem tegangan sama dengan atau lebih besar dari 16 kV
D	Instrumen/proteksi transformator dengan sistem tegangan nominal diatas 170 kV
E	Instrumen/proteksi transformator dengan sistem tegangan nominal sampai dengan 170 kV
F	Diverter tanks pada on-load tap-changers (OLTC), termasuk combined selector/diverter tank
G	Isolasi minyak pada circuit breaker dengan sistem tegangan sampai dengan 72.5 kV Isolasi minyak pada switch, seperti metal-enclosed <i>switchgear</i> dan perlengkapan kendali dengan sistem tegangan di bawah 16 kV

Dari Tabel 2.3 dapat ditentukan kategori untuk sistem isolasi minyak pada transformator daya sesuai dengan sistem tegangan nominal. Sedangkan untuk

klasifikasi tes tegangan tembus dari kategori peralatan transformator, adalah sebagai berikut:

Tabel 2.4 Aplikasi dan Interpretasi dari Tes Pengujian Tegangan Tembus

Jenis pengujian	Kategori	Batas Rekomendasi		
		Baik	Sedang	Buruk
Tes tegangan tembus (kV)	O,A,D	>60	50-60	<50
	B,E	>50	40-50	<40
	C	>40	30-40	<30
	F	<30 kV untuk OLTC pada aplikasi titik belitan bintang <40 kV untuk OLTC pada aplikasi titik belitan delta		
	G	<30		

Ketahanan isolasi terhadap tegangan tembus dengan model kegagalan menggambarkan isolasi minyak akan terjadi kegagalan pada suatu waktu. Dalam keadaan umum isolasi minyak yang di uji dengan pengujian tegangan tembus menghasilkan hasil yang terus menurun maka waktu durasi dari umur isolasi minyak tersebut akan berkurang, (Akbar, 2018).

Minyak transformator, sesuai standar uji PLN (SPLN) 49-1/1982 harus memiliki tegangan tembus 30kV/2,5mm dan menurut *International Electrotechnical commission* (IEC 156) tegangan tembus pada suatu transformator adalah seperti yang tercantum pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Standar Tegangan Tembus IEC 156

Tegangan Operasi Trafo	Jarak Gap (mm)	Nilai Minimum (kV)
Un	2,5	30
36<Un≤70	2,5	35
70<Un≤70	2,5	40
170>Un	2,5	50

2.1.10 Mekanisme Tembus Isolasi Cair

Isolasi cair sering digunakan karena memiliki kerapatan 1000 kali atau lebih tinggi dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga memperoleh kekuatan dielektrik yang lebih tinggi menurut hukum Paschen. Saat mengisi celah atau ruang yang perlu diisolasi, isolasi cair secara bersamaan melakukan proses konversi untuk menghilangkan panas yang muncul akibat rugi energi. Selain itu, isolasi cair cenderung memiliki kemampuan memperbaiki diri sendiri (*self-healing*) jika terjadi pelepasan muatan (*discharge*). Namun, kelemahan dari media isolasi ini adalah rentan terhadap kontaminasi. Berbagai faktor, seperti luas daerah elektroda, jarak celah, sistem pendinginan, perawatan sebelum pemakaian, pengaruh kekuatan dielektrik dari minyak transformator, serta kondisi pengujian, turut memengaruhi kekuatan dielektrik dari minyak transformator dan dapat mempengaruhi kegagalan minyak transformator, (D, 2018).

Mekanisme ketembusan isolasi cair melibatkan proses di mana tegangan listrik yang tinggi menyebabkan isolasi cair menjadi konduktif dan mengalirkan arus hal ini bisa disebabkan karena ionisasi, peluahan, dan uap air.

Ketembusan isolasi (*insulation breakdown, insulation failure*) disebabkan karena beberapa hal antara lain isolasi tersebut sudah lama dipakai, berkurangnya kekuatan dielektrik dan karena isolasi tersebut dikenakan tegangan lebih. Pada prinsipnya tegangan pada isolator merupakan suatu tarikan atau tekanan (*stress*) yang harus dilawan oleh gaya dalam isolator itu sendiri agar supaya isolator tidak tembus. Dalam struktur molekul material isolasi, elektron-elektron terikat erat pada molekulnya, dan ikatan ini mengadakan perlawanan terhadap tekanan yang

disebabkan oleh adanya tegangan. Bila ikatan ini putus pada suatu tempat maka sifat isolasi pada tempat itu hilang. Bila pada bahan isolasi tersebut diberikan tegangan akan terjadi perpindahan elektron-elektron dari suatu molekul ke molekul lainnya sehingga timbul arus konduksi atau arus bocor. Karakteristik isolator akan berubah bila material tersebut termasuk suatu ketidakmurnian (*impurity*) seperti adanya arang atau kelembaban dalam isolasi yang dapat menurunkan tegangan tembus, (Junaidi, 2008).

Tegangan tembus pada minyak transformator memiliki kecenderungan untuk menurun seiring dengan peningkatan suhu. Peningkatan temperatur dapat menyebabkan pemecahan molekul-molekul yang ada dalam minyak transformator, yang pada gilirannya menyebabkan kehilangan sifat dielektrik dari minyak tersebut. Semakin tinggi suhu, maka nilai faktor kehilangan dielektriknya juga akan semakin tinggi, yang berdampak pada penurunan tegangan tembus minyak transformator, (Jonathan F Simamora, 2011: 47 dalam Harinata et al., 2019).

Beberapa macam faktor yang diperkirakan mempengaruhi kegagalan minyak transformator seperti luas daerah elektroda, jarak celah (*gap spacing*), pendinginan, perawatan sebelum pemakaian (elektroda dan minyak), pengaruh kekuatan dielektrik dari minyak transformator yang diukur serta kondisi pengujian atau minyak transformator itu sendiri juga mempengaruhi kekuatan dielektrik minyak transformator, (Akbar, 2018).

2.1.11 Teori Kegagalan Isolasi Cair

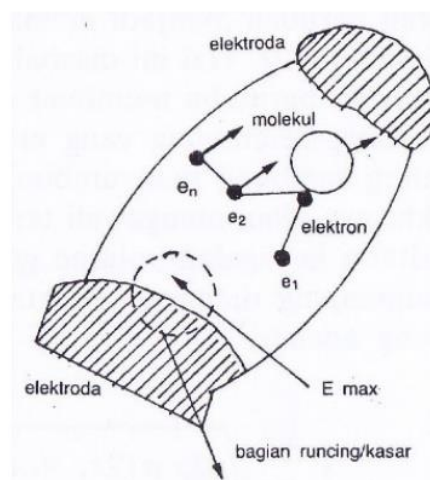
Isolasi berfungsi sebagai pemisah pada bagian-bagian yang mempunyai beda tegangan agar diantara bagian-bagian tersebut tidak terjadi lompatan listrik atau percikan. Isolasi cair dipengaruhi pada trafo, rangkaian pemutus atau CB, kondensator, kabel, dan lain sebagainya. Karakteristik pada isolasi minyak trafo akan berubah jika terjadi ketidakmurnian didalamnya. Hal ini dapat mempercepat terjadinya proses kegagalan. Kegagalan isolasi cair dipengaruhi oleh tegangan yang tinggi dengan waktu yang cepat sehingga proses terjadinya breakdown voltage akan semakin cepat. Kegagalan isolasi ini berkaitan dengan adanya *partial discharge*. Kegagalan pada isolasi cair disebabkan adanya kavitasi, yaitu butiran pada zat cair yang terkontaminasi dengan material isolasi cair, (D, 2018).

Pada dasarnya tegangan pada isolasi merupakan suatu tarikan atau tekanan (*stress*) yang harus dilawan oleh gaya yang terdapat pada isolasi. Dalam struktur molekul material isolasi, elektron-elektron terikat pada molekulnya, karena ada tegangan maka elektron yang masih terikat mengadakan perlawanan. Apabila ikatan ini terputus pada suatu tempat maka sifat isolasi pada tempat itu hilang karena telah terurai menjadi elektron bebas, (Sayogi, 2020).

a. Teori Kegagalan Elektronik

Teori ini merupakan ekstensi dari teori kegagalan dalam gas, yang menyiratkan bahwa proses kegagalan dalam zat cair dianggap mirip dengan yang terjadi dalam gas. Oleh karena itu, diperlukan adanya elektron awal yang disisipkan ke dalam zat cair untuk memicu kegagalan. Elektron awal ini menjadi inisiasi bagi proses kegagalan. Jika elektroda memiliki permukaan

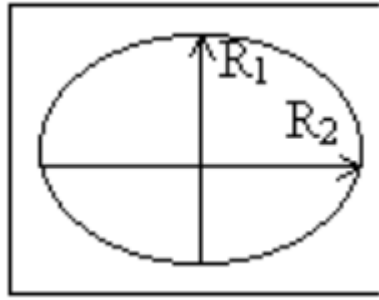
yang tidak rata, terdapat bagian yang tajam di mana medan terkuat berkumpul. Titik paling kuat ini akan melepaskan elektron e_1 yang menginisiasi pembentukan banjir elektron. Elektron yang dihasilkan, seperti e_1 , e_2 , e_3 , dan e_n , akan menyebabkan arus konduksi muncul dalam zat cair pada pada kuat medan yang tinggi. Kerapatan arus yang timbul mengikuti pola yang ditunjukkan dalam Gambar 2.8, (Akbar, 2018).



Gambar 2.8 Kegagalan Elektronik
Sumber: (Akbar, 2018)

b. Teori Kegagalan Bola Cair

Zat isolasi jika mengandung sebuah bola cair dari jenis cairan lain, kemungkinan terjadi kegagalan karena ketidakstabilan tetesan tersebut dalam medan listrik. Medan listrik akan menyebabkan tetesan cair yang tertahan dalam bahan isolasi memanjang sejajar dengan medan, dan pada titik kritis medan ini, tetesan tersebut menjadi tidak stabil. Jalur kegagalan akan menyebar dari ujung tetesan tersebut menjadi tidak stabil. Jalur kegagalan akan menyebar dari ujung tetesan yang memanjang, mengakibatkan kegagalan total. Tetesan cair yang terkena medan listrik E akan berubah bentuk menjadi sferoida, seperti yang digambarkan dalam Gambar 2.9, (Akbar, 2018).



Gambar 2.9 Medan listrik berbentuk Sferoida
Sumber: (Akbar, 2018)

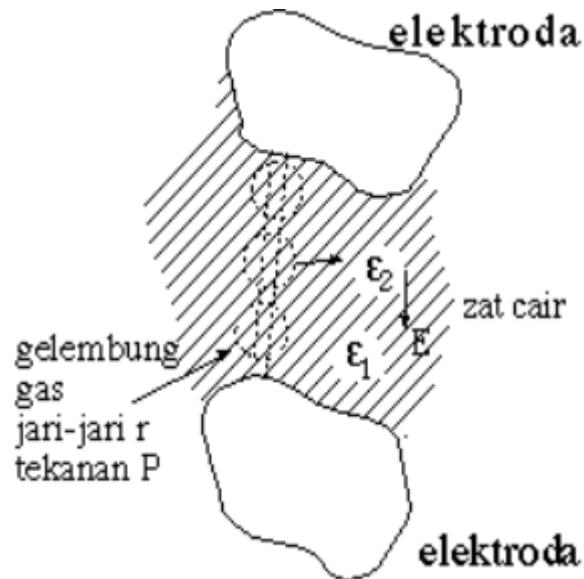
c. Teori Kegagalan Gelembung atau Kavitasi pada Zat Cair

Kegagalan gelembung atau kavitasi merupakan bentuk kegagalan isolasi zat cair yang disebabkan oleh gelembung-gelembung gas didalamnya. Hal-hal yang menjadi penyebab timbulnya gelembung gas adalah :

1. Permukaan elektroda tidak rata, sehingga terjadi kantong kantong udara dipermukaannya
2. Tabrakan elektron sehingga terjadi produk-produk baru berupa gas
3. Penguapan cairan karena adanya lucutan pada bagian bagian elektroda yang tajam dan tidak teratur
4. Zat cair mengalami perubahan suhu dan tekanan.

Jika medan listrik di dalam gelembung udara mencapai tingkat yang setara dengan batas medan ionisasi gas, maka kemungkinan terjadi lucutan pada gelembung tersebut. Keadaan ini akan mempercepat pembentukan gas karena terjadi dekomposisi zat cair, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan

isolasi. Pengaruh medan terhadap bentuk gelembung udara dapat dilihat pada Gambar 2.10.

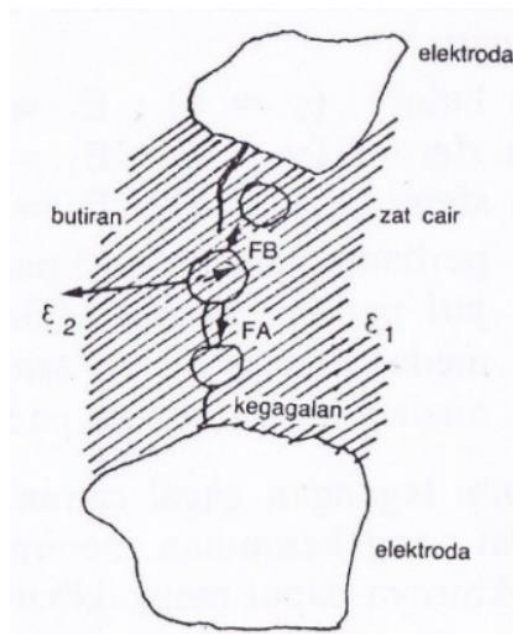


Gambar 2.10 Kegagalan kavitas pada media isolasi cair
Sumber: (Akbar, 2018)

Pengaruh medan yang kuat diantara elektroda maka gelembung-gelembung udara dalam cairan tersebut akan berubah menjadi memanjang searah dengan medan. Gelembung-gelembung tersebut akan saling sambung menyambung dan membentuk jembatan yang akhirnya akan mengawali terjadinya kegagalan,(Akbar, 2018).

d. Teori Kegagalan Butiran Padat Dalam Cairan

Kegagalan butiran padat adalah jenis kegagalan yang disebabkan oleh adanya butiran zat padat (partikel) didalam isolasi cair yang akan memulai terjadi kegagalan. Jika butiran-butiran padat mempunyai permitivitas ϵ_2 dan permitivitas media isolasi cair adalah ϵ_1 , dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Kegagalan butiran padat dalam media isolasi cair
Sumber: (Akbar, 2018)

Untuk medan yang seragam, seperti elektroda bola ataupun pada elektroda piringan sejajar dengan celah kecil, medan paling kuat bertempat pada tempat yang seragam. Dalam hal ini $E^2 = 0$ dan butiran dalam keadaan seimbang. Karena itu, butiran akan ditarik oleh gaya ke tempat dimana medan seragam. Akibatnya butiran padat akan menempati antara kedua elektroda dan seakan membuat jembatan yang dapat disebut jembatan serat, kemudian jembatan serat ini yang akhirnya akan mengawali terjadinya kegagalan pada media isolasi cair, (Akbar, 2018).

2.1.12 Kekuatan Dielektrik

Kekuatan dielektrik dapat didefinisikan sebagai tekanan dielektrik maksimum yang dapat mengalirkan arus listrik dalam bahan dielektrik atau ukuran ketahanan suatu material terhadap tegangan tinggi tanpa berakibat terjadinya kedadalan listrik (*electrical breakdown*). Ketika medan listrik memasuki bahan

dielektrik, dan mencapai medan kritisnya, medium mengalami *dielectric breakdown*, sehingga aliran arus dapat melewati dielektrik. Kekuatan dielektrik cair tergantung pada sifat atom dan molekul cairan, material elektroda, temperatur, jenis tegangan yang diberikan, gas yang terdapat dalam cairan dan sebagainya yang dapat mengubah sifat molekul cairan. Pada dielektrik cair, kekuatan dielektrik setara dengan tegangan yang terjadi, (Ayu and Umiati, 2010)

Ketidakhurnian dalam minyak trafo menyebabkan kondisi yang tidak stabil dalam medan listrik yang dapat menyebabkan kegagalan sehingga ketahanan isolasi atau kekuatan dielektrik akan menurun. Kenaikan tegangan tembus pada minyak isolasi transformator yang telah dipurifikasi menyebabkan peningkatan nilai kekuatan dielektriknya. Analisa hasil perhitungan kekuatan dielektrik rata-rata minyak transformator dapat dihitung nilai kekuatan dielektrik, (Mahardika, Winardi and Syakur, no date).

$$E = \frac{V_b}{d} \text{ (kV/mm)} \quad (2.7)$$

Keterangan:

V_b = Tegangan tembus (kV)

E = Kekuatan dielektrik (kV/mm)

D = Jarak sela (mm)

2.1.13 Pengaruh Medan Listrik Terhadap Isolasi Cair

Apabila pada bahan dielektrik diberikan medan listrik yang melebihi kemampuannya maka isolasi akan mengalami tegangan tembus dan kerusakan peralatan listrik sehingga kontinuitas kerja sistem terganggu. Hal ini disebabkan oleh dua faktor yaitu adanya tegangan lebih dan pemanasan termal karena adanya

energi panas yang ditimbulkan oleh penghantar listrik. Panas yang ditimbulkan penghantar dapat menyebabkan kenaikan temperatur isolasi di atas suhu kerjanya. Apabila pemanasan ini berlangsung terus menerus isolasi akan mengalami pemburukan dan juga dapat menyebabkan kegagalan isolasi yang dapat menyebabkan terjadinya tegangan tembus, hal ini dikarenakan isolasi sudah tidak mampu lagi untuk menahan tegangan tinggi yang melaluinya. Agar tidak terjadi kegagalan isolasi maka perlu diketahui terlebih dahulu kemampuan kerja isolasi yang digunakan, (Harinata, Ilham and Yusuf, 2019).

Apabila diberikan suatu medan listrik maka partikel ini akan terpolarisasi. Jika partikel tersebut lembab atau basah maka gaya ini makin kuat karena permitivitas air tinggi. Partikel yang lain akan tertarik ke daerah yang bertekanan tinggi hingga partikel partikel tersebut bertautan satu dengan lainnya karena adanya medan. Hal ini menyebabkan terbentuknya jembatan hubung singkat antara elektroda. Arus yang mengalir sepanjang jembatan ini menghasilkan pemanasan lokal dan menyebabkan kegagalan, (Tajuddin, 1998).

2.1.14 Statistika Tegangan Tinggi

Tes statistik adalah metode yang digunakan untuk menguji apakah suatu asumsi atau pernyataan tentang distribusi probabilitas (yang sepenuhnya atau sebagian) tidak diketahui, apakah kompatibel dengan sampel konkret yang telah diambil, atau apakah distribusi yang diasumsikan berbeda secara signifikan (yaitu, dengan kepastian statistik yang telah ditentukan) dari distribusi sebenarnya.

Perbandingan antar sampel seringkali diperlukan untuk membuat keputusan tentang penggabungan sampel individu menjadi sampel total yang besar, pengaruh parameter tertentu, atau terjadinya ketergantungan selama pengujian. Ada berbagai tes matematika untuk membandingkan $k > 2$ sampel independen dengan variabel kontinu. Beberapa di antaranya adalah:

1. Analisis Varians (F test): Digunakan untuk menguji apakah nilai rata-rata dari k sampel berasal dari populasi dengan nilai rata-rata yang sama. Syaratnya adalah populasi harus terdistribusi normal dan variannya tidak diketahui tetapi sama.
2. Scheffe Test: Digunakan setelah penolakan hipotesis dalam analisis varian untuk menguji apakah nilai rata-rata k adalah signifikan berbeda. Syaratnya sama dengan F test.
3. Duncan Test: Digunakan setelah penolakan analisis varians, tetapi dua nilai rata-rata yang dipilih secara acak dari k nilai diuji untuk kesamaan.
4. Cochran Test: Relevan khususnya untuk tes rutin untuk analisis statistik mereka, terutama untuk pengukuran *discharge* sebagian.
5. Hartley Test: Digunakan untuk menggabungkan sampel komponen untuk membentuk sampel yang sangat besar. Syaratnya adalah sampel k harus berukuran sama
6. Bartlett Test: Lebih mudah dilakukan dan kurang presisi dibandingkan Hartley Test, tetapi syaratnya sama.
7. Test (Kruskal/Wallis): Digunakan untuk menentukan apakah k sampel berasal dari populasi yang sama, terlepas dari fungsi distribusi mereka. Ini

adalah tes bebas distribusi (analog dengan U test untuk dua sampel) dan sampel dapat berukuran berbeda.

Percobaan acak adalah suatu eksperimen umum di mana hasilnya tidak pasti dengan pasti, dan dapat diulangi sebagaimana diinginkan. Saat percobaan dilakukan, ada proses acak yang terjadi. Di bawah pengaruh acak ini, hasil percobaan menjadi peristiwa acak. Dalam perhitungan probabilitas, ketidakpastian tentang kemungkinan terjadinya suatu peristiwa tertentu diilustrasikan dengan angka dimensi. Misalnya, dalam uji tegangan konstan, susunan insulasi diberikan tegangan berulang dengan pola gelombang dan amplitudo tertentu. Saat insulasi terpapar tegangan, proses acak dapat meningkatkan intensitas persiapan elektron, yang pada gilirannya dapat menyebabkan pelepasan sebagian dan bahkan kerusakan. Hasil percobaan dapat berupa kejadian *breakdown* (D) atau non-*breakdown* (N), dengan *breakdown* sendiri dapat terdiri dari *breakdown* (D), pelepasan sebagian stabil (T), dan kebebasan dari pelepasan (F). Dalam kasus uji tegangan konstan berulang, jumlah kejadian N akan sama dengan jumlah kejadian T dan F, (Hauschild and Mosch, no date).

Kapasitas isolasi suatu sistem insulasi dapat dipertahankan selama tidak terjadi proses pembuangan yang mengakibatkan kerusakan di dalamnya. Penentuan kapasitas isolasi dalam situasi teknis memerlukan voltase yang sesuai, dengan tegangan karakteristik, atau tegangan tahan, ditetapkan pada peristiwa "non-breakdown" yang dapat diamati, namun pengukuran harus didasarkan pada peristiwa "kerusakan". Uji tegangan bolak-balik atau tegangan langsung bertujuan untuk menguji kemampuan insulasi dalam menahan tegangan servis dan lonjakan

tegangan, meskipun pemulihan kapasitas isolasi cairan hanya sebagian setelah pelepasan muatan listrik, seperti melalui reaksi kimia plasma yang menghasilkan gas hidrokarbon ringan dan jelaga karbon. Sisa gelembung di dalam minyak juga dapat menyebabkan penurunan signifikan dalam kapasitas isolasi. Penting untuk dicatat bahwa tegangan listrik tinggi dengan durasi singkat dapat menyebabkan kerusakan yang sama seperti tegangan rendah dengan durasi yang lebih lama, yang pada gilirannya mempengaruhi umur pemakaian isolasi, (Hauschild and Mosch, no date).

Susunan isolasi yang digunakan pada tingkat isolasi yang sama dalam sebuah sistem harus memiliki tegangan tahan yang telah disepakati bersama (dibakukan), yaitu nilai tegangan yang isolasi mampu bertahan dalam metode uji standar. Metode uji tersebut digunakan secara luas di seluruh dunia sebagai uji tipe dan rutin pada isolasi. Namun, metode ini hanya bermakna ketika dipertimbangkan dari sudut pandang statistik. Menguji tegangan tahan bolak-balik dan tegangan tahan DC. Uji tegangan bolak-balik (atau langsung) bertujuan untuk menunjukkan bahwa isolasi dapat menahan tegangan layanan, lonjakan tegangan sesekali, dan (hanya untuk tegangan isolasi yang lebih rendah) lonjakan peralihan. Untuk menunjukkan nilai tegangan tahan yang ditetapkan, benda uji menjalani prosedur yang hampir identik untuk tegangan bolak-balik dan tegangan searah. Standar saat ini untuk tegangan impuls menentukan metode yang berbeda dan konten informasinya tidak sama. Prosedur-prosedur yang identik digunakan untuk menunjukkan nilai tegangan tahan beralih dan nilai tegangan tahan petir. Prosedur-prosedur ini dibagi berdasarkan kapasitas regenerasi isolasi. Dalam kasus isolasi

yang dapat pulih sendiri (isolasi udara; secara kondisional, isolasi gas), dua metode diizinkan dengan pembenaran yang sama. Ketika fungsi kinerja tegangan breakdown isolasi diketahui, uji dianggap berhasil jika tegangan tembus lebih besar dari tegangan tahan, dipastikan untuk tegangan breakdown 10%. Karena fungsi kinerja juga merupakan prasyarat untuk koordinasi isolasi statistik, metode ini memperhitungkan pertimbangan statistik yang paling dekat.

Dalam kasus isolasi yang tidak dapat pulih sendiri (susunan isolasi terdiri dari bahan padat, kombinasi bahan padat dan cair, atau bahan padat dan gas), uji dianggap berhasil jika tidak ada breakdown yang terjadi dalam $n = 3$ aplikasi tegangan tahan yang ditetapkan. Dalam kasus kombinasi isolasi yang dapat pulih sendiri dan tidak dapat pulih sendiri (misalnya isolasi SF₆ pada peralatan sakelar, di mana ruang hampa gas dapat pulih sendiri tetapi jarak flashover pada spacer tidak dapat pulih sendiri), uji dianggap berhasil jika, dari 15 impuls yang diberikan, tidak ada breakdown yang terjadi pada bagian yang tidak dapat pulih sendiri, dan tidak lebih dari dua *breakdown* terjadi pada bagian yang dapat pulih sendiri. Metode ini mengasumsikan bahwa lokasi *breakdown* dapat ditentukan dengan jelas. Jika hal ini tidak terjadi, maka tidak boleh ada breakdown yang diizinkan.

Dalam pengujian isolasi cair ketergantungan yang besar terhadap kekuatan dielektrik pada kandungan kelembaban menyebabkan perlunya langkah-langkah ketat untuk pengeringan minyak dan ruang uji serta mencegah kelembaban selama pengujian. Selama bekerja dengan minyak yang sudah kering dengan baik, bahkan ruang uji terbuka dapat digunakan dalam pengujian yang berlangsung kurang dari sehari. Ruang tertutup, yang memungkinkan sirkulasi minyak dan pengeringan,

disarankan untuk seri pengujian yang lebih lama. Spesifikasi yang jelas harus disediakan untuk pembersihan elektroda dan ruang uji, proses pengeringan (ditambah evakuasi apa pun), proses pengisian, dan laju sirkulasi minyak, (Hauschild and Mosch, no date).

2.1.15 Rugi-Rugi Dielektrik (Tan Delta (δ))

Delta (δ) adalah sudut rugi-rugi yang terbentuk ketika sebuah arus yang terukur dari isolasi yang tidak ideal atau kurang dari sudut 90° ($90-\Theta$), arus yang menghasilkan sudut 90° bersifat kapasitif (IC), namun dalam realitanya terdapat arus yang bersifat resistif (IR) yang membuat sudut yang dihasilkan kurang dari 90° , dalam hal ini dapat dikatakan semakin tinggi nilai kapasitansi semakin bagus nilai isolasi dari perangkat elektronik, dan Tan Delta (δ) adalah sebuah metode yang digunakan untuk mengukur nilai kapasitansi sebuah isolasi dari perangkat elektronik, (Abidin, 2019).

Rugi-rugi dielektrik diduga kuat disebabkan oleh adanya elektron bebas dalam isolasi cair. Keberadaan elektron bebas inilah yang menyebabkan adanya arus konduksi dalam minyak. Apabila arus konduksi semakin besar maka sudut rugi-rugi dielektrik makin besar, (Sayogi, 2020).

Karakteristik $\tan \delta$ digunakan untuk mengevaluasi efisiensi dielektrik. Pengaruh langsung dari naiknya nilai $\tan \delta$ adalah terjadinya pemanasan dielektrik. Sedangkan pengaruh tidak langsungnya adalah naiknya korosi logam, laju kerusakan dielektrik, larutan air, emulsifikasi air dan kecepatan oksidasi, (Sayogi, 2020).

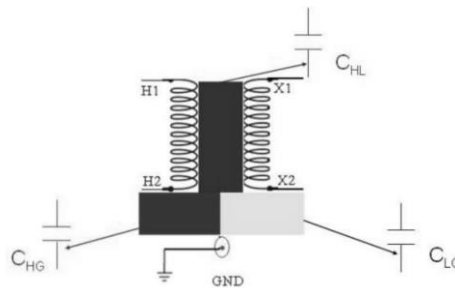
Untuk menentukan nilai $\tan \delta$ dapat digunakan rumus ini:

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\varepsilon\omega} = \frac{1}{\rho\varepsilon\omega} \quad (2.8)$$

ρ = Resistivitas

ε = Konstanta

ω = Frekuensi



Gambar 2.12 Kapasitansi Transformator

Metode pengujian Tan Delta (δ) dapat digunakan untuk mengukur tingkat isolasi dari transformator, sebuah isolasi dikatakan bagus jika bersifat kapasitif, pada transformator terdapat 3 bagian yang dapat diukur nilai kapasitansinya yaitu kapasitansi *High Voltage* ke *Low Voltage* (CHL), Kapasitansi *High Voltage* ke *Ground* (CHG) dan Kapasitansi *Low Voltage* ke *Ground* (CLG). Dari 3 bagian pengukuran nilai kapasitansi antar belitan (CHL) memiliki factor koreksi yang cukup kecil karena tidak terpengaruhi oleh kontaminasi dari permukaan luar, sedangkan pada *bushing High Voltage*(CHG) dan *bushing Low Voltage* (CLG) kontaminasi pada permukaan akibad debu, kotoran, dll dapat mempengaruhi hasil pengukuran, berikut adalah standar nilai *Dissipation Factor* (Tan Delta (δ)) menurut Doble (ANSI C 57.12.90) jika nilai tan delta kurang dari 0,5% maka masuk ke dalam kategori bagus sedangkan jika lebih dari 1 maka masuk ke kategori buruk, (Abidin, 2019).

Tabel 2.6 Standar nilai Dissipation Factor (Tan Delta (δ))

Nilai Tan Delta	Kategori
<0,5%	Bagus
0,5%>x<0,7%	Cukup
0,7%>x<1%	Investigasi
>1%	Buruk

2.2 Penelitian Terkait

Banyak penelitian yang mengkaji tentang purifikasi menggunakan karbon aktif. Namun penelitian tersebut mempunyai karakteristik dan hasil yang berbeda. Penelitian yang terkait dengan penelitian yang dilakukan sebagai berikut.

Tabel 2.7 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
1	Efektivitas Arang Sekam Padi Dalam Memperbaiki Tegangan Tembus Minyak Transformator Bekas	(Pratiwi and Asri, 2022)	Penelitian ini membahas mengenai purifikasi minyak transformator dalam memperbaiki tegangan tembus dengan menggunakan arang aktif sekam padi. Bahan aktivator yang digunakan adalah NAOH sebanyak 100 ml dengan metode kimia untuk proses pengaktifannya & HCl. Hasil dari salah satu sampel diperoleh nilai untuk nilai sebelum dipurifikasi yaitu 10,35kV sedangkan setelah dire-purifikasi yaitu 27 kV, tingkat rata-rata kenaikan tegangan tembus pada masing-masing proses yakni sebesar 166,99%.
2	Perbaikan Nilai Tegangan Tembus Minyak Isolasi Trafo Nynas Lybra dengan Purifikasi Menggunakan Arang Aktif Tongkol Jagung	(Jahidi, Pratiwi and S, 2020)	Penelitian ini membahas mengenai <i>re-purifikasi</i> minyak transformator dalam memperbaiki tegangan tembus dengan menggunakan arang aktif tongkol jagung. Minyak transformator yang digunakannya adalah minyak trafo nynas lybra. Bahan aktivator yang digunakan adalah NAOH 240 ml, HCl 500 ml. Pengujian ini menggunakan minyak trafo 400 ml dengan jarak sela elektroda 2,5 mm. Hasil dari percobaan tersebut menghasilkan tegangan tembus rata-rata minyak trafo

No	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
			bekas sebelum purifikasi sebesar 10,3 kV sedangkan untuk minyak trafo yang telah dipurifikasi dengan arang aktif tongkol jagung tegangan tembus rata-rata sebesar 27.5 kV dengan persentase kenaikan tegangan tembus sebesar 166,99% dari keadaan awal.
3	<i>Highly efficient adsorbent for the transformer oil purification by ZnO/Graphene composite</i>	(Vu et al., 2020)	Penelitian ini membahas mengenai pemurnian minyak transformator dengan adsorben ZnO dan urea sebagai prekursor basa. Variabel terikatnya adalah 2 gram ZnO dan 2 gram zeolit yang diaduk selama 1 jam dengan minyak trafo bekas, lalu dilakukan pengujian tegangan tembus. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa komposit ZnO memiliki kapasitas pemurnian lebih tinggi dibandingkan adsorben konvensional, faktor yang mendukung hal itu adalah luas permukaan yang spesifik tinggi.
4	<i>Using activated carbon from waste date-pits as an adsorbent for transformer oil regeneration</i>	(Al-Zuhair, Noura and Fardoun, 2011)	Penelitian ini membahas mengenai pemurnian minyak transformator menggunakan biji dari limbah kurma, dengan diaktivasi secara fisika. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan DP-AC pada purifikasi minyak transformator meningkat yang awalnya pada 20 kV menjadi 30 kV. Hasilnya jelas menunjukkan bahwa minyak hasil regenerasi mempunyai tingkat viskositas, densitas, tegangan antar muka, dan tegangan tembus yang dapat diterima. Satu-satunya nilai yang tidak dapat diterima adalah indeks netralisasi, dimana DP-AC meskipun berhasil menurunkannya sebesar 66%, namun belum mencapai tingkat yang dapat diterima, namun mendekatinya secara signifikan. Hasil yang ditemukan dalam penelitian ini menunjukkan kemampuan DP-AC untuk digunakan sebagai penyerap regenerasi minyak transformator.

No	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
5	<i>Performance of palm shell activated carbon as an alternative adsorbent for reclamation of used transformer oil</i>	(Ghani, Muhama d and Zainuddin, 2015)	Penelitian ini membahas mengenai pemurnian minyak trafo bekas menggunakan adsorben dari tanah liat, bentonit dan karbon aktif cangkang sawit. setiap sampel sebelum & sesudah proses reklamasi ditentukan dengan menggunakan spektroskopi UV-Vis. Hasilnya adsorben karbon aktif bentonit dan cangkang sawit mengurangi kandungan relatif DDP dua kali lipat nilai yang dicapai oleh tanah liat, khususnya selama siklus <i>re-purifikasi</i> pertama dan ketiga, sekaligus meningkatkan kekuatan dielektrik sampel minyak <i>re-purifikasi</i> . Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penggunaan karbon aktif cangkang sawit memberikan persentase peningkatan tertinggi pada uji tegangan tembus, yaitu sebesar 57,14% setelah siklus reklamasi kelima. Disimpulkan bahwa karbon aktif cangkang sawit merupakan adsorben alternatif yang menjanjikan untuk <i>re-purifikasi</i> minyak transformator bekas.
6	<i>Improvement of Some Chemical and Electrical Properties of Aged Transformer Oil using Eco-Friendly Fillers</i>	(Taha et al., 2020)	Penelitian ini membahas mengenai pemurnian minyak trafo bekas menggunakan bentonite aktif, karbon aktif, Silica Fume yang digunakan dalam bentuk bahan pengisi campuran dengan urutan (AB+AC), (AB+SF) dan (SF+AC). Tiga sifat keasaman sebagai sifat kimia, faktor disipasi dan tegangan tembus sebagai sifat listrik diuji untuk rangkaian campuran, peningkatan dicapai melalui prosedur reklamasi lingkungan. Hasil terbaik pada tingkat keasaman diperoleh pada campuran 1:5 (AB+SF) dengan 0,072 mg KOH/g minyak dan persentase peningkatan sebesar -30,8% sedangkan peningkatan pada faktor disipasi menunjukkan hasil sebesar 0,039 dan peningkatan sebesar 61% untuk campuran 1:7 SF+AC. Tegangan tembus menunjukkan peningkatan sebesar 122,9% dari 78 KV/2,5 mm.

No	Judul Jurnal	Penulis, Tahun	Pembahasan Jurnal
7	<i>Transformer oil reclamation by combining several strategies enhanced by the use of four adsorbents</i>	(Safiddin e et al., 2017)	Penelitian ini membahas mengenai pemurnian minyak trafo bekas menggunakan: karbon aktif (ACH), silika gel (SG), magnesium oksida (MO) dan bentonit aktif (AB). Persentase peningkatan tertinggi terjadi pada campuran adsorben kuaterner yang terdiri dari 1% karbon aktif (ACH), 6% silika gel (SG), 1% magnesium oksida (MO), dan 2% bentonit aktif (AB). Selain itu, seperti yang ditekankan dalam hasil, parameter restorasi (warna, faktor disipasi, resistivitas, permitivitas, bilangan asam) memenuhi standar BS EN 60422(2013) dan IEEE

Tabel 2.8 Tegangan tembus arang aktif dari beberapa jurnal

Jenis arang	Penulis, Tahun	Aktivator	Tegangan tembus
Arang aktif sekam padi	(Pratiwi and Asri, 2022)	NaOH dan HCl	Sebelum <i>re-purifikasi</i> : 10,35 kV Setelah <i>re-purifikasi</i> : 27,076 kV
Arang aktif tongkol jagung	(Jahidi, Pratiwi and S, 2020)	NaOH dan HCl	Sebelum <i>re-purifikasi</i> : 10,3 kV Setelah <i>re-purifikasi</i> : 27,5 kV
Arang aktif biji kurma	(Al-Zuhair, Noura and Fardoun, 2011)	Aktivasi fisika pada suhu 900°C menggunakan aliran CO ₂ sebagai pengganti nitrogen	Sebelum <i>re-purifikasi</i> : 20 kV Setelah <i>re-purifikasi</i> : 30 kV
Arang aktif cangkang sawit	(Ghani, Muhamad and Zainuddin, 2015)	Tidak dicantumkan	Sebelum <i>re-purifikasi</i> : 9 kV Setelah <i>re-purifikasi</i> : 21 kV

Pada Tabel 2.8 ini dijelaskan ada beberapa jenis arang yang diaktivasi dengan menggunakan aktivator berbeda ada yang menggunakan aktivasi secara kimia dan

juga secara fisika. Penelitian terkait berfungsi untuk analisa dan menambah pembahasan penelitian, serta membedakannya dengan penelitian yang sedang dilakukan. Dalam penelitian ini disertakan 5 jurnal internasional dan 2 jurnal nasional Tabel 2.6 yang berhubungan dengan konsep perbaikan isolasi dengan proses *re-purifikasi*, diantaranya sebagai berikut :

1. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian Tabel 2.6 nomor 1 akan digunakan sebagai patokan peneliti untuk melakukan uji tegangan tembus yaitu dengan melakukan uji tegangan tembus sebanyak 5x setiap sampel, dan melakukan uji tegangan tembus dengan alat pengujian tegangan tinggi AC. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut yaitu konsentrasi karbon aktif dalam proses purifikasi yang diuji. Penelitian tersebut hanya terdapat satu konsentrasi yang diuji sedangkan pada penelitian ini terdapat beberapa konsentrasi karbon aktif dan bahan absorben yang digunakan berbeda dengan penelitian ini.
2. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian Tabel 2.6 nomor 2 akan digunakan sebagai patokan penelitian yaitu parameter yang akan dinilainya yaitu adalah tegangan tembus dari minyak trafo, volume dari minyak trafo bekas yang diuji adalah 400 ml, dan uji tegangan tinggi yang digunakan adalah AC. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut yaitu dari jumlah konsentrasi karbon aktif yang akan diuji sehingga bisa menyimpulkan konsentrasi berapa gram yang akan mendekati nilai standar.
3. Penelitian pada Tabel 2.6 nomor 3 yaitu melakukan *re-purifikasi* dengan menggunakan absorben ZnO/Graphene. Penelitian tersebut membandingkan

minyak terhadap pengaruh perlakuan terhadap keasaman minyak, tegangan tembus, viskositas minyak yang telah diolah dan warna minyak, membuktikan bahwa ketika ada perubahan diantara tersebut maka akan berpengaruh pada kualitas minyak. Sehingga penelitian tersebut akan dijadikan referensi teori dalam melakukan penelitian. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian tersebut terdapat pada fokus penelitiannya.

4. Penelitian Tabel 2.6 pada nomor 4 melakukan *re-purifikasi* menggunakan limbah biji kurma. Penelitian tersebut membandingkan minyak trafo tua terhadap tegangan tembus dan menghasilkan kenaikan tegangan tembus pada awalnya yaitu 20 kV menjadi 30 kV. Perbedaan dengan penelitian tersebut yaitu dalam pengujian tegangan tingginya. Penelitian ini menggunakan tegangan tinggi AC sedangkan penelitian tersebut menggunakan tegangan *break-down*, yang diukur menggunakan Foster OTS60. Sehingga penelitian tersebut akan dijadikan referensi teori dalam melakukan penelitian.
5. Penelitian Tabel 2.6 pada nomor 5 melakukan *re-purifikasi* menggunakan cangkang kelapa sawit, tanah fuller dan karbon aktif bentonit, untuk mengetahui efektivitas adsorben setelah *re-purifikasi*. Perbedaan dengan penelitian tersebut yaitu adalah standar uji tegangan tembus yang digunakan untuk penelitian tersebut menggunakan standar BS EN 60422:2013 dan IEEE Std 637-1985 (R2007). Sehingga penelitian tersebut akan dijadikan referensi teori dalam melakukan penelitian.
6. Penelitian Tabel 2.6 pada nomor 6 melakukan perbaikan minyak trafo bekas dengan menggunakan bentonit aktif (AB), karbon aktif (AC) dan Silika (SF).

Dibuat beberapa campuran (AB+AC), (AB+SF) dan (SF+AC). Kesamaan penelitian tersebut yaitu dalam pengujian tegangan tembusnya itu terdapat beberapa sampel minyak yang di uji, perbedaannya yaitu penelitian tersebut yang menjadi acuannya yaitu lamanya waktu, sedangkan penelitian ini yaitu konsentrasi dari karbon aktifnya. Sehingga penelitian tersebut akan dijadikan referensi teori dalam melakukan penelitian.

7. Penelitian Tabel 2.6 pada nomor 7 melakukan perbaikan minyak trafo bekas dengan menggunakan 4 absorben yaitu karbon aktif (ACH), silika gel (SG), magnesium oksida (MO) dan bentonit aktif (AB). Penelitian ini oli bekas diolah di separator MAB (Marque Alfa Laval SA – Asal Spanyol) dengan teknik sentrifugasi kecepatan tinggi (5000–9000 tr/menit). Perawatan ini dilanjutkan dalam sirkuit tertutup selama empat hingga lima lintasan dari total volume oli dengan suhu oli dalam sirkulasi. Sehingga penelitian tersebut akan dijadikan referensi teori dalam melakukan penelitian.